

新型混合边界真三轴仪加载装置及岩土材料试验结果

殷建华¹, 周万欢¹, Md. Kumruzzaman¹, 郑俊文²

(1. 香港理工大学土木及结构工程系, 香港 九龙; 2. 阿特金斯顾问有限公司, 英国 伦敦)

摘要: 介绍一个新型土力学真三轴仪加载装置—刚性滑板加柔性面的混合边界加载装置。利用三维有限元模型分析两种不同加载装置对土样应力应变分布的影响。分析表明新的刚性滑板加载设计使土样中的应力应变更加均匀。最后讨论了一组完全风化花岗岩土和一组土工泡沫材料的真三轴试验结果。完全风化花岗岩土的排水剪切试验在等 p' , 不等 b 条件下进行。土工泡沫材料的试验在等 b , 不等 p' 条件下进行。试验结果表明完全风化花岗岩土的最大偏应力随 b 值增加而减小。土工泡沫材料摩擦角为负值, 具有屈服点随 p' 值增大而减小的特性。

关键词: 真三轴; 加载装置; 完全风化花岗岩土; 应力路径

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2010)04-0493-07

作者简介: 殷建华(1956-), 男, 博士, 教授, 主要从事土力学、软土工程、边坡分析与监测及室内试验等方面的教学与研究工作。E-mail: cejhyin@polyu.edu.hk。

New mixed boundary true triaxial loading device for testing study on 3-D stress-strain-strength behaviour of geomaterials

YIN Jian-hua¹, ZHOU Wan-huan¹, Md. Kumruzzaman¹, CHENG Chun-man²

(1. Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China, 2. Atkins Ltd., London, UK)

Abstract: A brief review of the true triaxial apparatuses (TTA) developed in the past and their advantages and limitations are presented. Considering the limitations of previous designs, a new true triaxial loading device which provides mixed boundary conditions for a TTA is introduced. A three-dimensional finite element (FE) modelling study is carried out on the stress and strain distribution of a soil specimen subjected to loading from two different loading devices. It is found that the stresses and strains of the soil specimen subjected to loading from the new sliding plates are far more uniform than those subjected to loading from non-sliding plates with preset gaps. Finally, the applications of the present TTA with the new loading device for testing studies on a completely decomposed granite soil and a geofoam are introduced. Typical results are presented and discussed.

Key words: true triaxis; loading device; completely decomposed granite; stress path

0 引言

岩土工程中常常遇到三维分析问题。测量和研究土单元在三维应力状态下的应力-应变-强度特性具有理论和实践意义。真三轴仪的设计及试验研究一直是一个活跃并且具有挑战性的研究领域。许多学者利用真三轴仪试验研究了第二主应力对于岩土材料应力-应变-强度特性的影响^[1-5]。

本文首先简要回顾真三轴仪的发展, 然后介绍香港理工大学研究开发的采用新型混合边界加载装置的真三轴仪系统。利用三维有限元模型研究了两种不同加载方式对土样应力/应变分布的影响。最后, 利用新的真三轴仪对香港完全风化花岗岩土和岩土泡沫材料进行了真三轴试验, 并对试验结果进行了讨论。

1 真三轴仪发展回顾

真三轴仪的试验土样通常是边长为 70 mm (或更大) 的立方体 (或长方体)。真三轴仪的基本要求是对土样施加 3 个主应力, 使土样中产生均匀的应力和应变。真三轴试验的加载装置可以分为 3 种类型。以下分别讨论 3 种加载装置的发展及各自优缺点。

类型 1 刚性加载方式: 由 6 个刚性板对土样施加 3 个直角方向的力。其代表是“剑桥式真三轴仪”中采用的滑动的刚性板加载设计^[6-8]。这个设计的问题在于: 土样安装比较困难; 虽然加载板的位移是均匀的, 但土中的应力和应变并不均匀; 安装在刚性加载板上的排水管可能增加土样与加载板之间的摩擦。刚

收稿日期: 2008-11-25

性加载方式设计中,除了采用滑动刚板的设计,有些学者采用 3 对预留空隙的刚性板设计^[9-10]。这种真三轴仪比滑动刚板式的真三轴仪存在更多问题。

类型 2 柔性加载方式:由 6 个柔性加载囊组成,利用橡胶囊内的液体/气体对土样施加 3 个直角方向的力。Bell^[11] 最早研制了这种柔性边界加载的真三轴仪。Ko 和 Scott^[12]讨论了 Bell^[13]的柔性加载设计的优缺点,指出这种设计的最大问题是加载囊仅仅对 60% 的土样表面进行加载,导致土样内部产生不均匀应力。随后许多学者对柔性加载方式的真三轴仪进行了改进和应用^[5, 13-17]。柔性加载设计的优点有:加载囊内的压力易于控制;土样表面(除了在转角处)的应力基本均匀;加载囊和土样表面的摩擦较小。缺点在于:土样表面的应变非常不均匀,相邻加载囊之间会相互挤压并产生影响;无法实现大应变的试验。

类型 3 混合边界加载方式:由刚性板和柔性面组成的混合加载方式。Green^[18-19]首先开发了混合加载方式的真三轴仪。将正方体(或长方体)的土样密封在一个压力室内,竖向活塞对土样施加竖向最大主应力,压力室内的压力控制最小主应力,中间主应力由左右两块刚性板控制。在 Green^[18-19]的真三轴仪加载装置中,竖向与水平加压板之间留有空隙以避免试验中相互挤压。而这个空隙会造成土样中产生不均匀的应力和应变。美国 GCTS(Geotechnical Consulting and Testing System)公司开发的混合加载的真三轴系统也采用了这种在相邻加载板之间留有空隙的设计。这种设计的优点有:压力室内的压力容易控制;竖向和水平板之间存在空隙,不会相互挤压。缺点在于:由于空隙的存在,对土样施加的应力和应变不均匀,土样在转角处会产生不均匀应变;如果预留空隙太小或压缩应变太大,土样在转角处易产生较大不均匀应力和应变。Lade 和 Duncan^[20]开发了没有预留空隙的混合加载装置。装置中两个水平加载板由碾压的不锈钢和轻质木材组成,在水平方向具有较大模量,而竖直方向可以压缩。许多国内外学者采用 Lade 和 Duncan^[20]的设计进行了真三轴试验^[4, 21-24]。这种采用碾压板的混合加载设计的优点在于:压力室内的压力容易控制;上下刚板施加的应变是均匀的;水平加载板施加的应变大体均匀;竖向和水平向加压板之间没有相互接触问题;可以进行大应变试验。这种设计的缺点在于:由于组成侧向碾压板的不锈钢和轻质木材具有不同的模量,可能导致加载板与土样的接触面不均匀,在土样表面产生摩擦和不均匀应力;即使碾压板中的不锈钢具有较大模量,碾压板仍会在水平向产生压缩变形,从而降低水平位移测量的准确性。国内学者在真三轴

仪的研制和试验方面很早开展了工作^[22]。清华大学李广信教授在 80 年代采用由刚性板和柔性面的加载装置(类型 3:混合加载方式)进行了大量试验^[26]。他们的真三轴系统中,土样两侧的刚板和上下加压刚板之间需要留有适当大小的空隙。河海大学殷宗泽教授早在 80 年代也开发了类似 Lade 和 Duncan^[20]设计(类型 3:混合加载方式)的真三轴仪^[26]。整个土样和加压板在压力室内。最近殷宗泽教授和朱俊高教授进一步改进他们的真三轴仪,去掉压力室,改用外置的充压柔性橡皮囊加压^[26]。

2 新型混合边界的真三轴仪加载装置

香港理工大学土力学实验室采用新型的刚性滑板加柔性面的真三轴加载装置。真三轴仪中的其它必要部件及数据采集系统由美国 GCTS 公司提供。图 1 是 GCTS 公司提供的真三轴系统中最初的加载装置的照片。这个初始设计属于相邻加载板之间预留空隙的混合边界加载类型。如前所述,在空隙太小或是压缩位移太大的情况下,相邻加载板之间会发生接触。如果预留空隙过大,会导致土样中产生很大不均匀的应力和应变。

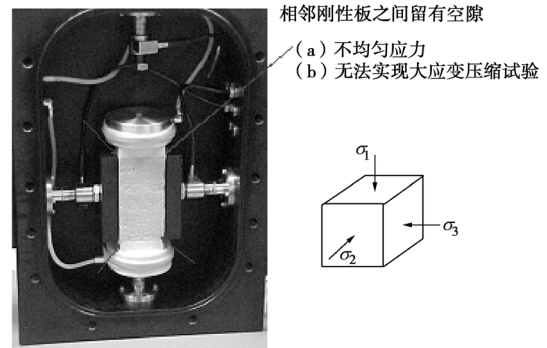


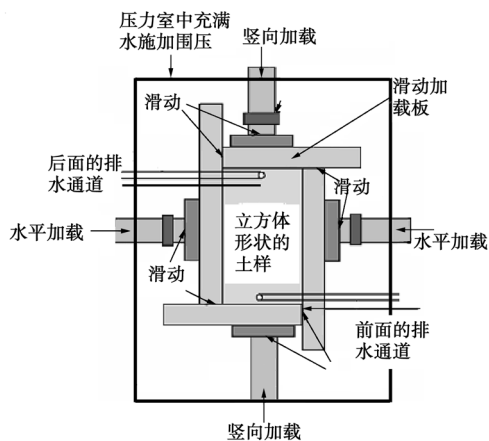
图 1 最初的预留空隙的加载装置(GCTS 2007)

Fig. 1 A true triaxial cell with old loading plates having corner interference problems (GCTS 2007)

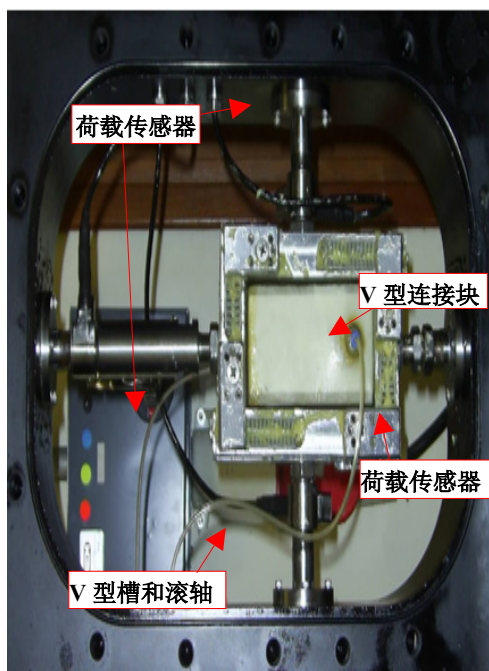
为了克服上述问题,本文作者设计并开发了一个创新的混合边界的加载装置,如图 2 所示。新设计中采用 4 个可以滑动的刚性板设计,其特点如下:

(1) 土样尺寸:土样是 70 mm×70 mm×140 mm 的长方体,由一个相同形状和大小的橡胶膜密封。

(2) 排水设计:橡胶膜前后分别设有 2 个直径为 4 mm 的孔,如图 2 所示。用特别的连接元件将小孔与塑料管密封相连,以实现在真三轴试验中对土样进行排气,反压饱和,以及监测土样在固结/压缩过程中的水体积变化。这个排水设计的优点是不会在土样表面产生摩擦力。



(a) 示意图



(b) 试验照片

图2 新型混合边界的真三轴加载装置

Fig. 2 A new mixed loading boundary true triaxial cell

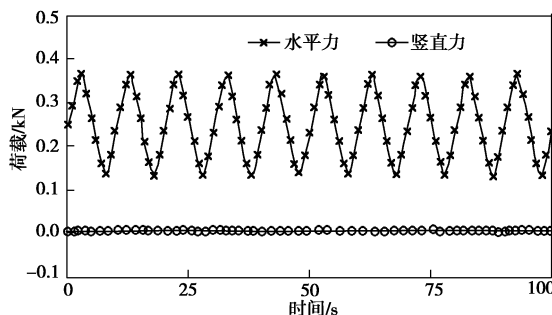
(3) 滑动加载板: 加载装置中有4个自由滑动的不锈钢加载板, 分别布置在土样的上、下、左、右表面, 如图2所示。竖向和水平向加载板可自由滑动, 并在试验过程中始终保持 90° 。

(4) 加压活塞及荷载传感器: 加载装置中设有4个加压活塞。加载板和加压活塞之间设有不锈钢连接杆。在压力室内, 3个荷载传感器分别连接在上、左、和右边的连接杆上, 用来测量施加在土样的荷载。

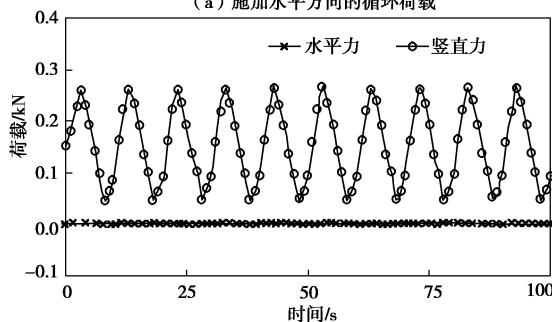
(5) 在荷载作用下, 加载板在连接杆推动下朝土样中心方向自由滑动, 在滑动加载板与橡胶膜表面之间使用润滑油以减小摩擦。

(6) 位移传感器: 4个位移传感器位于压力室外, 与活塞相连, 用来测量加载板施加在土样上的位移, 用于计算土样的压缩或应变。

(7) 试验数据采用自动化电子采集。所有传感器都连接到一个控制器上。控制器与电脑直接连接, 对试验进行控制和数据采集。利用 GCTS 公司提供的 CATS 软件可自动控制土样饱和, 固结, 以及指定的应力或应变路径条件下真三轴试验。数据采集频率可以达到 0.01 s 。控制中采用的 PID 算法用来调整输出通道的数据符合实时的目标指令。



(a) 施加水平方向的循环荷载



(b) 施加竖直方向的循环荷载

图3 新型混合边界的真三轴加载装置在小幅循环荷载作用下的试验结果

Fig. 3 Performance of sliding design and mechanical-electronic control system

这个柔性面加滑动钢板的混合边界加载装置的设计巧妙的解决了以往真三轴加载装置中遇到的问题。实现了水平和竖直方向的加载不会相互影响。图3是在一个橡胶试样的水平和竖直方向上施加小幅度循环荷载的试验结果。在一个方向(水平或竖直)的循环荷载作用下, 其垂直方向(竖直或水平)上的加压板保持初始位置。从图3中可以看出, 当一个方向上加载时, 在垂直方向的加载板上没有产生明显的力。也就是说, 这个滑动板设计可以在一个方向加载而不产生另一方向的附加力, 从而实现了在不同方向上的均匀加载。这个试验结果也验证了整套机械-电子采集系统的可靠性。

3 三维有限元模拟土样在两种不同加载装置中的应力应变分布

利用三维有限元软件 ABAQUS^[27]研究土样在两种不同的混合加载边界(新的刚性滑板设计, 和旧的

预留空隙的设计) 的真三轴加载装置中的应力 - 应变的分布情况。土样尺寸为 $70 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ 。考虑到土样在真三轴试验中在 3 个方向的对称性, 三维模型中只需模拟 1/8 的土样 (尺寸为 $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$), 如图 4 所示。模型 1 (图 4 (a)) 模拟土样在有刚性滑板设计的加载装置中。模型 2 (图 4 (b)) 模拟土样在有预留空隙固定板设计的加载装置中。模型 2 中的预留空隙分别是 5 mm 和 10 mm 。

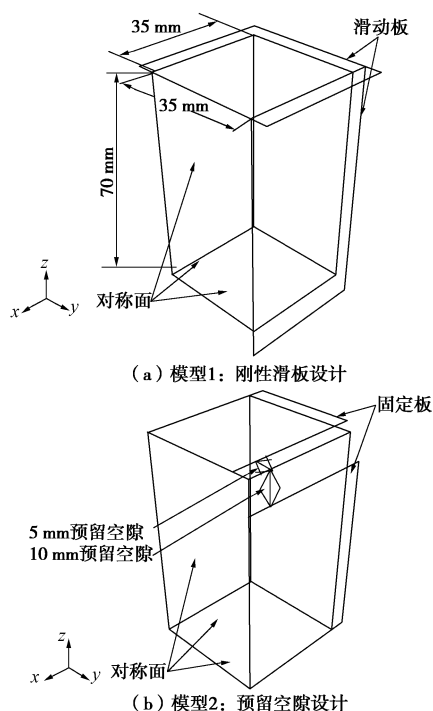


图 4 两种混合边界加载装置的三维有限元模型

Fig. 4 3-D finite element models for a quarter of a brick-shaped soil specimen (70 mm by 70 mm by 140 mm)

土样的弹性模量和泊松比分别是 20 MPa 和 0.25 。模型中的土样采用线性六面体单元划分。两个加载板简化为刚性板, 用线性四边形单元表示。土样表面的橡胶膜与刚性板之间的摩擦接触采用库伦模型模拟, 摩擦系数为 0.07 (相当于 4° 摩擦角)。模型的计算步骤是: ①在土样 3 个方向上施加围压荷载 200 kPa , 土样建立应力平衡; ②在围压 200 kPa 条件下, 对土样在水平和竖直方向的加载板同时施加的压缩位移, $u_z = 8 \text{ mm}$ (竖直方向) 和 $u_y = 4 \text{ mm}$ (水平方向)。在压缩过程中, 模型 1 中的上加载板向下移动 8 mm , 而右加载板向左移动 4 mm , 同时向下移动 8 mm 。模型 2 中, 上加载板向下移动 8 mm , 而右加载板仅向左移动 4 mm , 没有竖直方向的移动。

压缩过程是一个理想的平面应力问题, 即围压保持不变: $\Delta\sigma_x = 0$ 。根据各向同性的线弹性理论:

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu \\ \nu & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \end{Bmatrix} \quad (1)$$

对于 $\Delta\varepsilon_y = 4/35 = 0.1143$ 和 $\Delta\varepsilon_z = 8/70 = 0.1143$, 可以得到土样的应力变化 $\Delta\sigma_y$ 和 $\Delta\sigma_z$ 为 3048 kPa , 因此土样的应力、应变的理论解分别为 $\varepsilon_y = \varepsilon_z = 0.1143$ 和 $\sigma_y = \sigma_z = 3248 \text{ kPa}$ 。这个理论解可以用来评价土样在两种加载模型中的应力应变分布情况。

图 5 是有限元模拟的土样在两种加载装置中压缩后的应变在 3 个剖面上的分布结果。图中“ E_z ”代表土样在 z 方向的总应变, 即, ε_z 。图中列出了在两个模型结果中最大和最小的应变值 (压缩应变为负值)。可以看出, 模型 1 中土样大部分面积的应变值为 “ -0.1143 ”, 即 0.1143 压应变; 模型 2 中压应变为 0.1143 的面积较小。而且, 模型 2 中的预留空隙附近 (图 5 (b) 中阴影部分) 应变值很大。从有限元结果的分析比较中可以看出土样在刚性滑板加载装置设计 (模型 1) 中的应变分布比在预留空隙的固定板设计中更加均匀。

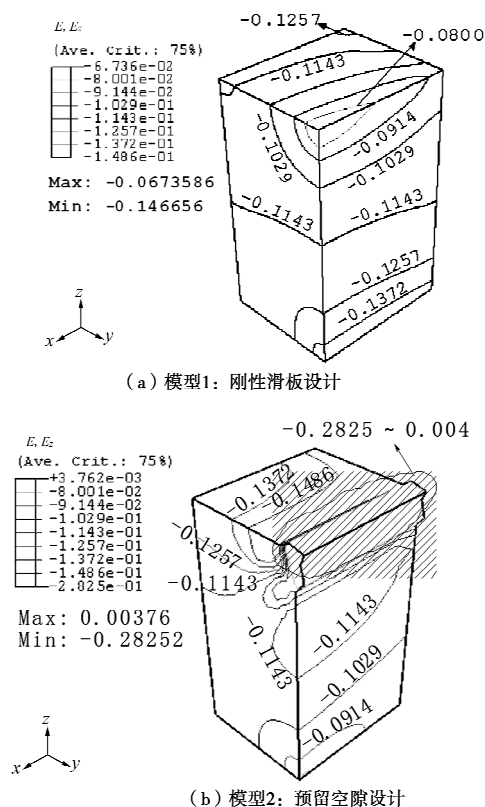


图 5 三维有限元模拟土样应变分布

Fig. 5 Strains from 3-D FE modeling

图 6 是两个模型计算的应力分布结果。图中“ S_z ”分别代表土样在 z 方向的应力, 即, σ_z 。从图中可以看出, 模型 1 中的大部分应力值为 “ -3248 ”, 即 3248 kPa 压应力。但模型 2 中由于预留空隙的存在, 压应力为 3248 kPa 的范围较小。这表明土样在模型 1 中的

应力比在模型2中更加均匀。

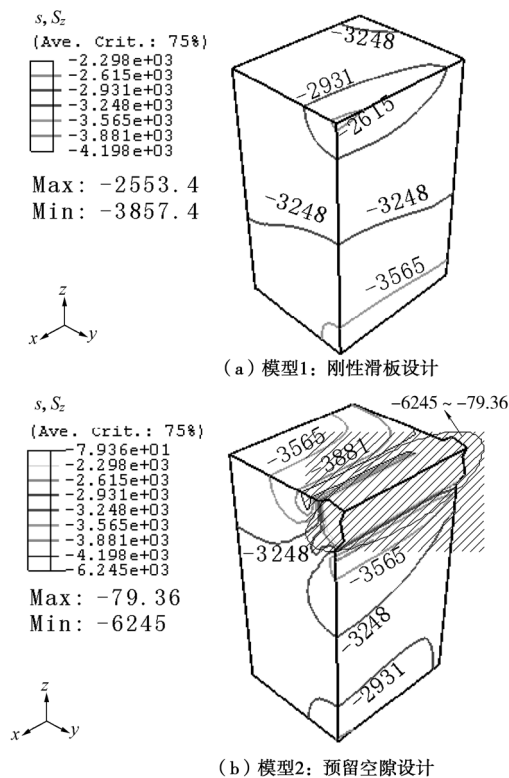


图6 三维有限元模拟土样应力分布

Fig. 6 Stresses from 3-D FE modeling

4 真三轴试验及结果

4.1 试样制备及试验程序

首先介绍制备一个重塑的完全风化花岗岩土 (completely decomposed granite, CDG) 试样的过程。试验中, CDG 土样初始含水率为 13%~14%。土样依照 ASTM 标准 (D4767—95) 分 5 层砸实在一个 70 mm × 70 mm × 140 mm 的模具中。然后将土样从模中取出, 放入一个同样大小的橡胶薄膜 (厚度为 0.35 mm) 内。两个排水口分别设在薄膜的前后面。

将有橡胶膜密封的土样放入图 2 中所示的压力室内的 4 个滑动板中间。在滑动板与橡胶膜之间涂上润滑油, 以减少滑动板与橡胶膜之间的摩擦。将上下排水管分别与橡胶膜上的预留孔相连。然后将压力室的前后门关闭密封。试验程序为土样排气, 反压饱和, 固结, 和剪切。在 CDG 土样的排水剪切试验中, 剪切速率为 1.67 kPa/min。

对土工泡沫材料的真三轴试验方法与 CDG 土样相似。首先将土工泡沫材料制成 70 mm × 70 mm × 140 mm 的形状。试样放置和固结过程与 CDG 土样的试验方法相同。

在 CDG 土和土工泡沫材料的试验过程中, 通过调节偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 和/或 $(\sigma_2 - \sigma_3)$ 的大小实现平均

有效应力 p 保持不变, 即 $I_1' = \sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3' = \text{常数}$, 有效应力路径在同一个 π 平面上。

4.2 CDG 土及土工泡沫材料的真三轴结果

在真三轴固结排水试验中, 主应力方向与试样的 x, y, z 方向相同。平均有效主应力和偏应力由下面的公式得到

$$p' = (\sigma_x' + \sigma_y' + \sigma_z')/3 = (\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')/3, \quad (2)$$

$$q = \sqrt{[(\sigma_y' - \sigma_z')^2 + (\sigma_z' - \sigma_x')^2 + (\sigma_x' - \sigma_y')^2]/2}$$

$$= \sqrt{[(\sigma_2' - \sigma_3')^2 + (\sigma_3' - \sigma_1')^2 + (\sigma_1' - \sigma_2')^2]/2}, \quad (3)$$

其中, σ_1' , σ_2' 和 σ_3' 分别是最大、中间和最小主应力。 I_1 是应力的第一不变量。中间主应力的变化可以由 $b = (\sigma_2' - \sigma_3')/(\sigma_1' - \sigma_3')$ 值的变化表示。

图 7 是 CDG 土样在排水真三轴剪切试验得到的偏应力 (q/p') 与最大主应变的关系。图中显示了在恒定平均有效应力 $p' = 200$ kPa, 不同 b 值 ($b = 0.0, 0.2, 0.6$ 和 1.0) 条件下的结果。 $b=0$ 是传统的三轴压缩试验条件, 而 $b=1$ 是拉伸试验条件, 即竖向加载与水平加载的增量与围压 σ_3 的增量相同。图中每条曲线上的“o”符号标示了土样的出现 q/p' 的最大值的位置, 认为是土样的破坏点。可以看到土样先逐渐达到最大偏应力, 之后随应变继续发展达到破坏。图中可以清楚看到, 土样最大偏应力 (q/p') 值随 b 值增大而减小。

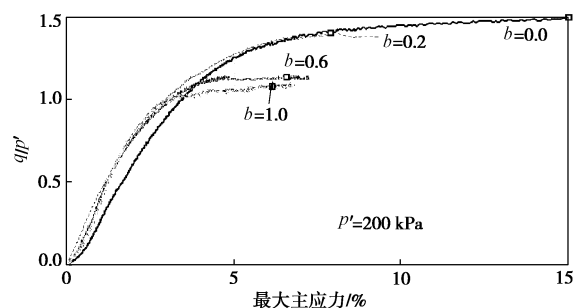


图7 CDG 土样在恒定有效应力 $p' = 200$ kPa, b 值为 0.0, 0.2, 0.6, 1.0 条件下的真三轴试验结果

Fig. 7 Curves of normalized deviator stress versus major principal strain for b -values of 0, 0.2, 0.6 and 1.0 from true triaxial tests on CDG specimens with a constant mean stress p' of 200 kPa

图 8 显示了土工泡沫材料的真三轴结果。图中是试样在 b 值为 1.0 和两个不同平均有效应力 $p' = 120$ kPa 和 180 kPa 条件下, 最大偏应力随最大主应变 ε_1 的变化关系。试验中的加载速率为 1.5 kPa/min。图中符号“o”标示了材料的屈服点。从图中可以看出, 最大偏应力随平均有效应力增加而减小。这与以往传统三轴试验中得到的结论一致^[28-29], 显示了泡沫材料具

有内摩擦角为负值的特性。

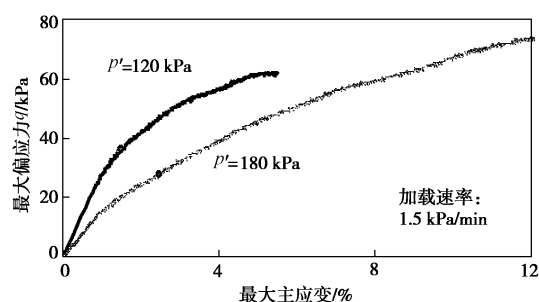


图8 土工泡沫材料在两个平均有效应力 $p' = 120$ kPa 和 180 kPa 以及 $b = 1.0$ 条件下的真三轴结果

Fig. 8 Curves of normalized deviator stress versus major principal strain for b -value of 1.0 from true triaxial tests on geofoam specimens with two different constant mean stresses $p' = 120$ kPa and 180 kPa

5 结 语

本文介绍了一个刚性滑板-柔性面混合边界加载的真三轴仪。简要回顾了真三轴仪的3种不同加载装置的设计和优缺点。重点介绍了新的真三轴加载装置中的刚性滑动板加柔性面的设计,以及整个真三轴试验过程。滑动板加柔性面的混合边界加载设计巧妙解决了加载板之间相互接触的问题。三维有限元分析比较了两种不同混合边界加载方式对土样应力应变分布的影响。分析表明土样在滑动板加载装置中的应力应变分布比在预留空隙的装置中更加均匀。

利用新的真三轴系统,对完全风化花岗岩(CDG)土进行了一组等 p' , 不等 b 的真三轴试验,试验结果表明完全风化花岗岩土的最大偏应力随 b 值增大而减小。对土工泡沫材料进行了等 b , 不等 p' 的真三轴试验,试验结果显示土工泡沫材料具有负的摩擦角,其屈服点随 p' 值增大而减小。

致 谢: 特别感谢中国香港特别行政区大学教育资助委员会和香港理工大学的资助。

参考文献:

- [1] YAMADA Y, ISHIHARA K. Anisotropic deformation characteristics of sand under three-dimensional stress conditions[J]. Soils and Foundations, 1979, **19**(2): 79 - 94.
- [2] OCHIAI H, LADE P V. Three-dimensional behaviour of sand with anisotropic fabric[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1983, **109**(10): 1313 - 1328.
- [3] LADE P V, MUSTANE H M. Three-dimensional behavior of remolded clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering

Division, ASCE, 1983, **104**(2): 193 - 209.

- [4] ABELEV A V, LADE P V. Effects of cross-anisotropy on three-dimensional behaviour of sand: I. stress-strain behaviour and shear banding[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2003, **129**(2): 160 - 166.
- [5] PRASHANT A, PENUMADU D. Effect of intermediate principal stress on overconsolidated kaolin clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2004, **130**(3): 284 - 292.
- [6] PEARCE J A. A new triaxial apparatus[C]// FOULIS G T, Stress-Strain Behaviour of Soils, Proceedings of the Roscoe Memorial Symposium, Cambridge, Henley-on-Thames. Cambridge, England, 1971: 330 - 339.
- [7] WOOD D M. Some aspects of the mechanical behaviour of kaolin under truly triaxial conditions of stress and strain[D]. Cambridge: Univ of Cambridge, 1974.
- [8] AIREY D W, WOOD D M. The Cambridge true triaxial apparatus[J]. Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock, 1988, ASTM STP 977: 796 - 805.
- [9] MATSUOKA H, SUN D A. Extension of spatially mobilized plane (SMP) to frictional and cohesive materials and its application to cemented sands[J]. Soils and Foundations, 1995, **35**(4): 63 - 72.
- [10] MATSUOKA H, SUN D A, KOGANE A, FUKUZAWA N, ICHIHARA W. Stress-strain behaviour of unsaturated soil in true triaxial tests[J]. Can Geotech J, 2002, **39**: 608 - 619.
- [11] BELL J M. Stress-strain characteristics of cohesionless granular materials subjected to statically applied homogeneous loads in an open system[D]. California: California Institute of Technology, 1965.
- [12] KO H-Y, SCOTT R F. A new soil testing apparatus[J]. Geotechnique, 1967, **17**(1): 40 - 57.
- [13] STURE S, DESAI C S. Fluid cushion truly triaxial or multi-axial testing device[J]. Geotechnical Testing Journal, 1979, **2**(1): 20 - 33.
- [14] SIVAKUGAN N, CHAMEAU J-L, HOLTZ R D, et al. Serve-controlled cuboidal shear device[J]. Geotechnical Testing Journal, 1988, **11**(2): 119 - 124.
- [15] REDDY K R, SAXENA S K, BUDIMAN J S. Development of a true triaxial testing apparatus[J]. Geotechnical Testing Journal, 1992, **15**(2): 89 - 105.
- [16] MANDEVILLE D, PENUMADU D. True triaxial testing system for clay with proportional-integral-differential (PID) control[J]. Geotechnical Testing Journal, 2004, **27**(2): 1 - 11.

- [17] CHOI C, ARDUINO P, HARNEY M D. Development of a true triaxial apparatus for sands and gravels[J]. Geotechnical Testing Journal, 2007, **31**(1): 1 - 13.
- [18] GREEN G E. Strength and compressibility of granular materials under generalized strain conditions[D]. London: University of London, 1969.
- [19] GREEN G E. Strength and deformation of sand measured in an independent stress control cell[C]// FOULIS G T, Ltd Co. Stress-Strain Behaviour of Soils, Proceedings of the Roscoe Memorial Symposium. Cambridge, England, 1971: 285 - 323.
- [20] LADE P V, DUNCAN J M. Cubical triaxial tests on cohesionless soil[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1973, **99**(10): 793 - 812.
- [21] 朱俊高, 卢海华, 殷宗泽. 土体侧向变形性状的真三轴试验研究[J]. 河海大学学报, 1995, **23**(6): 28 - 33. (ZHU Jun-gao, LU Hai-hua, YIN Zong-ze. Lateral deformation of soil in true triaxial test[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 1995, **23**(6): 28 - 33. (in Chinese))
- [22] 张坤勇, 殷宗泽, 徐志伟. 国内真三轴试验仪的发展及应用[J]. 岩土工程技术, 2003, **5**: 290 - 293. (ZHANG Kun-yong, YIN Zong-ze, XU Zhi-wei. Development and application of true triaxial apparatus in China[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2003, **5**: 290 - 293. (in Chinese))
- [23] SHAPIRO S, YAMAMURO J A. Effects of silt on three-dimensional stress-strain behaviour of loose sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, **129**(1): 1 - 11.
- [24] ALSHIBLI K A, WILLIAMS H S. A true triaxial apparatus for soil testing with mixed boundary conditions[J]. Geotechnical Testing Journal, 2005, **28**(6): 534 - 543.
- [25] 李广信. 土的三维本构关系的探讨与模型验证[D]. 北京: 清华大学, 1985. (LI Guang-xin. A study of three-dimensional constitutive relationship of soils and an examination of various models[D]. Beijing: Tsinghua University, 1985. (in Chinese))
- [26] 殷宗泽, 朱俊高. 真三轴仪的改进[C]// 姚仰平. 第一届全国岩土本构理论研讨会论文集. 北京: 北京航空航天大学, 2008. (YIN Zong-ze, ZHU Jun-gao. Improvement of true triaxial apparatus[C]// YAO Yang-ping. Proceedings of 1st National Conference on Geotechnical Constitutive Theory. Beijing: Beihang University, 2008. (in Chinese))
- [27] ABAQUS. HIBBITT D, KARLSSON B, SORENSEN P. ABAQUS v6.5 User's Manuals, Providence (RI), ABAQUS, Inc, 2005.
- [28] ATMATZIDIS D K, MISSIRLIS E G, CHRYSIKOS D A. An investigation of EPS Geofoam behaviour in compression[C]// EPS Geofoam 2001 - 3rd International Conference, Salt Lake City, Utah, USA, 2001.
- [29] WONG H, LEO C J. A simple elastoplastic hardening constitutive model for EPS geofoam[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2006, **24**: 299 - 310.